

# 1. 实验名称及目的

## 1.1 实验名称

基于系统模板的UUV模型验证（硬件在环仿真实验）

## 1.2 实验目的

对Simulink文件编译生成的UUV模型通过遥控器进行硬件在环仿真测试，通过本例程熟悉平台UUV模型的使用。

## 1.3 关键知识点

### 软/硬件在环仿真（SIL/HIL）的实现

从实现机制的角度分析，可将RflySim平台分为运动仿真模型、底层控制器、三维引擎、外部控制四部分。

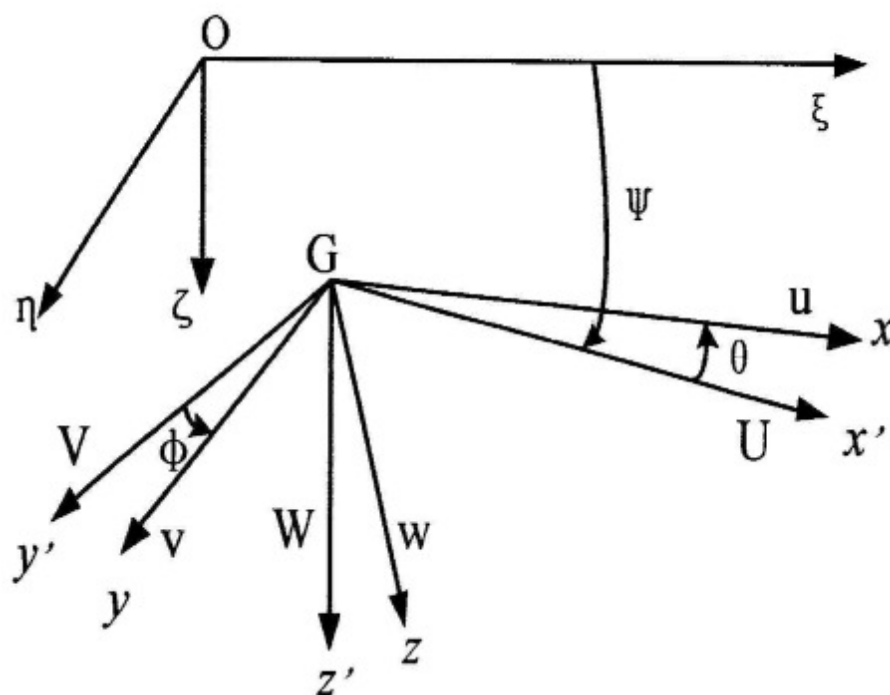
- 运动仿真模型：这是模拟飞行器运动的核心部分。在RflySim平台中，运动仿真模型是通过MATLAB/Simulink开发的，然后通过自动生成的C++代码转化成DLL（动态链接库）文件。在使用RflySim平台进行软硬件在环仿真时，会将DLL模型导入到CopterSim，形成运动仿真模型。这个模型在仿真中负责生成飞行器的运动响应，它拥有多个输入输出接口与底层控制器、三维引擎、地面控制站和外部控制进行数据交互，具体数据链路、通信协议及通信端口号见 [API.pdf中的通信接口部分](#)。
- 底层控制器：在软/硬件在环仿真（SIL/HIL）中，真实的飞行控制硬件（如PX4飞行控制器）被集成到一个虚拟的飞行环境中。在软件在环仿真（SIL）中，底层控制器（通过wsl上的PX4仿真环境运行）通过网络通信与运动仿真模型交互数据。在硬件在环仿真（HIL）中，它（将PX4固件在真实的飞行控制器（即飞控）硬件上运行）则通过串口通信与运动仿真模型进行数据交互。底层控制器是实际控制飞行器硬件（如电机和传感器）的部分。
- 三维引擎：这部分负责生成和处理仿真的视觉效果，提供仿真环境的三维视图，使用户能够视觉上跟踪和分析飞行器的运动。
- 外部控制：从仿真系统外部对飞行器进行的控制，包括自动飞行路径规划、远程控制指令等。在平台例程中主要通过地面控制站（QGC）、MATLAB和Python调用对应接口实

现。支持通过UDP\_Full、UDP\_Simple、MAVLINK\_Full、MAVLINK\_Simple等链接模式，获取无人机的位置、速度、姿态信息，并对无人机的位置、速度、航向进行控制。

## ■ 载具的基本动力学特性

无人潜水器的六自由度运动，主要分为沿机体坐标系的三个坐标轴的线性运动和绕坐标轴的转动。在实际建模过程中，可以使用现成的刚体六自由度模块

[..\..\RflySimSDK\html\md\\_ctrl\\_2md\\_26DOF.html](..\..\RflySimSDK\html\md_ctrl_2md_26DOF.html)根据载具运动时机体坐标系下合力和合力矩计算无人潜水器的运动状态。

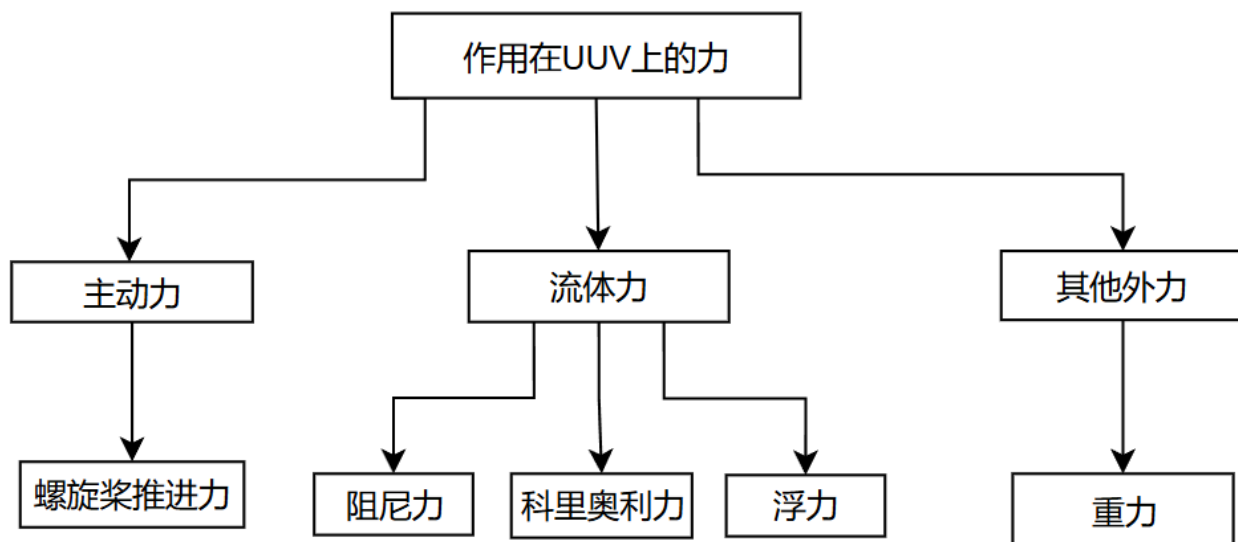


$O\xi\eta\zeta$ 为固定于地球表面的惯性坐标系（站心观测坐标系），取作全局坐标系，将坐标系建立在海平面上，原点 $O$ 选海中任意一点，规定 $\zeta$ 轴指向正北， $\eta$ 轴指向正东， $\xi$ 轴指向地心，且该坐标系固定不动，用来描述无人潜水器的位置和姿态。

$Gxyz$ 为固定于无人潜水器上的机体坐标系（运动观测坐标系），随潜水器运动，原点取潜水器的重心处，规定 $x$ 轴指向潜水器前方， $y$ 轴指向右侧， $z$ 轴指向潜水器正下方，用来描述无人潜水器的速度、加速度等运动状况。

## ■ 力和力矩合成

综合实际的执行器响应、载具运动状态以及环境干扰计算得出载具实际受到的力和力矩，UUV受到的力包括主动力：螺旋桨推力，流体力：水流阻力、侧向力及浮力，其他外力：重力、附加质量力、科里奥利力。



## 运动的六自由度分解

根据机身受到的总力和力矩（机体坐标系）来计算无人机的运动状态（包括机体系下的速度与加速度、欧拉角、角速度与角加速度；地球坐标系下的速度、位置；响应的旋转矩阵）。

PX4中无人水下潜水器模型有8个螺旋桨，左右两侧各有两个，前后方各有两个螺旋桨，运动可划分为六个自由度，分别为进退、侧移、升沉运动与横滚、俯仰、偏航运动。



运动自由度	坐标轴	运动学分析
进退	前向/后向 (Fore/Aft: x轴)	当两个后置螺旋桨以相同的速度顺时针方向旋转时，产生的推力使UUV向前运动，向后运动同理。
侧移	左/右 (Port/Starboard: y轴)	以上图为例，1、3号螺旋桨增加转速(或者2、4号螺旋桨增加转速)，会推动UUV侧移。
升沉	上/下 (Up/Down: z轴)	左右两侧的螺旋桨控制，提供的向上推力增加时UUV上升运动。

运动自由度	坐标轴	运动学分析
横滚	绕纵轴转动 (Longitudinal Axis: x轴)	左右两侧螺旋桨存在转速差，会产生绕x轴的滚转力矩
俯仰	绕横轴转动 (Lateral Axis: y轴)	对于两侧的螺旋桨来说，前后螺旋桨存在转速差，会产生绕y轴的俯仰力矩
偏航	绕垂直轴转动 (Vertical Axis: z轴)	两个后置螺旋桨差速产生的力矩会改变UUV的朝向。

## ■ 载具的控制通道映射

通过混控将归一化的期望力和力矩信号映射到归一化的PWM指令，再根据PWM指令通过电调模块ESC\_ALL..\..\RflySimSDK\html\md\_ctrl\_2md\_2ESC\_\_ALL.html计算出实际的执行器响应。下面结合PX4的混控规则介绍控制通道如何映射到载具模型的执行器输入。

## ■ PX4机架对应的混控器

[添加一个新的机型 | PX4 自动驾驶用户指南](#)

- 详细的PX4机架文件配置参考 [\(v1.12\)](#)

由机架文件是一种用于描述模型物理结构和控制分配的脚本文件，每个机架文件都有一个唯一的ID，对应QGC中的参数SYS\_AUTOSTART，无人潜水器模型的机架配置在\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu\_common\init.d\airframes\60002\_uuv\_bluerov2\_heavy中定义如下：

```
. ${R}etc/init.d/rc.uuv_defaults
```

执行rc.uuv\_defaults脚本，它包含了无人潜水器的默认参数设置，可以用来设置一些基本的系统参数

```
set PWM_OUT 12345678
```

PWM（脉冲宽度调制）是自驾仪系统用来控制电机和舵机的一种信号。设置PWM输出为12345678指定1~8号PWM通道是活跃的。

```
set MIXER vectored6dof
```

设置了混控器配置为vectored6dof（系统采用六自由度的向量控制）。。

## 混控通道对应的执行器

混控器和执行器 | PX4 自动驾驶用户指南

- 详细的PX4混控文件逻辑见：[\(v1.12\)](#)
- 详细的映射过程可参考：[PX4混控器相关知识梳理-CSDN博客](#)

本例的混控文件：

具体混控文件可参考\PX4PSP\Firmware\ROMFS\px4fmu\_common\mixers\vectored6dof.main.mix，其混控逻辑如下

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ M_r \\ M_p \\ M_y \end{bmatrix}$$

其中， $T_x$ ， $T_y$ ， $T_z$ 分别表示了水平面内的前后、左右、上下方向的推力； $M_r$ ， $M_p$ ， $M_y$ 分别表示了横滚、俯仰、偏航方向的力矩； $u_1$ 到 $u_8$ 分别表示了八个电机的油门。

## 载具模型的整体输入输出

- 本模型整体输入输出同，详见：  
[\[RflySim安装目录\]/RflySimAPIs/4.RflySimModel/1.BasicExps/e0\\_MinModelTemp/Readme.pdf](#)

## 2. 实验效果

遥控器标定以后，可以通过遥控器操控UUV模型的姿态和油门。



## 3. 文件目录

例程目录：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\4.RflySimModel\2.AdvExps\e9\\_UUV\1.UUV-HITL](#)

文件夹/文件名称	说明
UUVModel.dll	dll模型文件
<a href="#">UUV_HITLRun.bat</a>	硬件在环仿真批处理文件。
UUV.params	参数文件
px4_fm-v6x_default.px4	飞控固件

## 4. 运行环境

### 4.1 软件要求

Windows 10及以上版本；RflySim工具链；MATLAB 2017B及以上<sup>③</sup>；/。

①：若使用Pixhawk 6X飞控，平台安装时的编译命令为：px4\_fm-v6x\_default，推荐PX4固件版本为：1.12.3。其他配套飞控及编译命令请见：

## 4.2 硬件要求

笔记本/台式电脑① 1台；Pixhawk 6x或其他飞控② 1台；数据线 1台；天地飞ET10遥控器及接收机 1台。

①：推荐配置请见：<https://rflysim.com/>

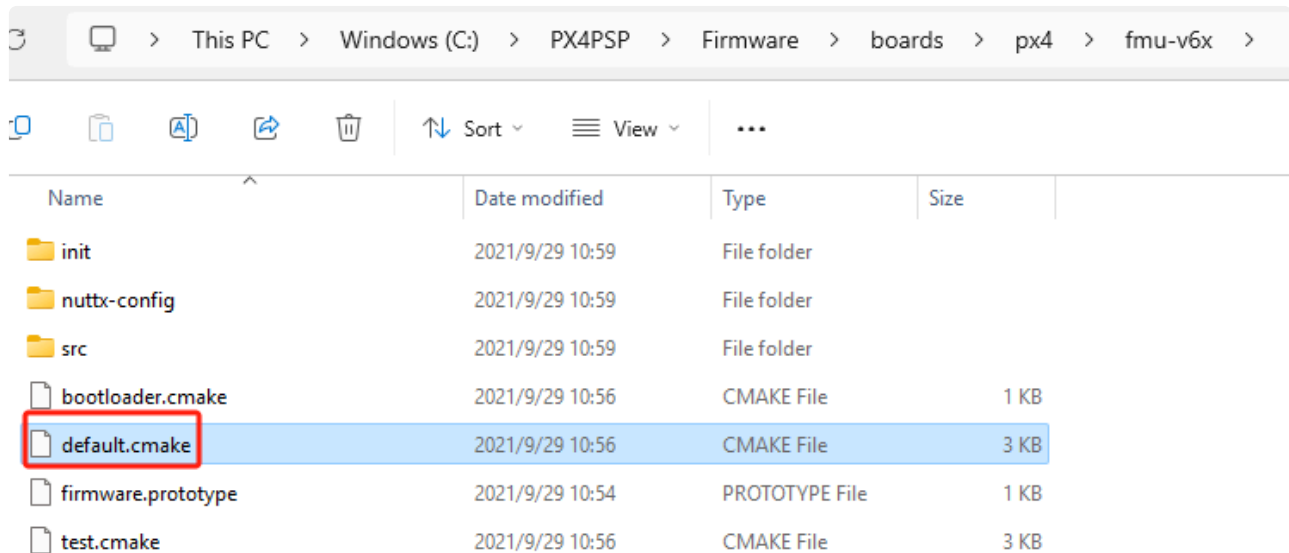
## 5. 实验步骤

### 5.1. 飞控配置

#### Step 1: 编译固件并烧录

推荐使用Pixhawk 6x飞控，固件版本1.12.3（本实验固件需单独设置）。

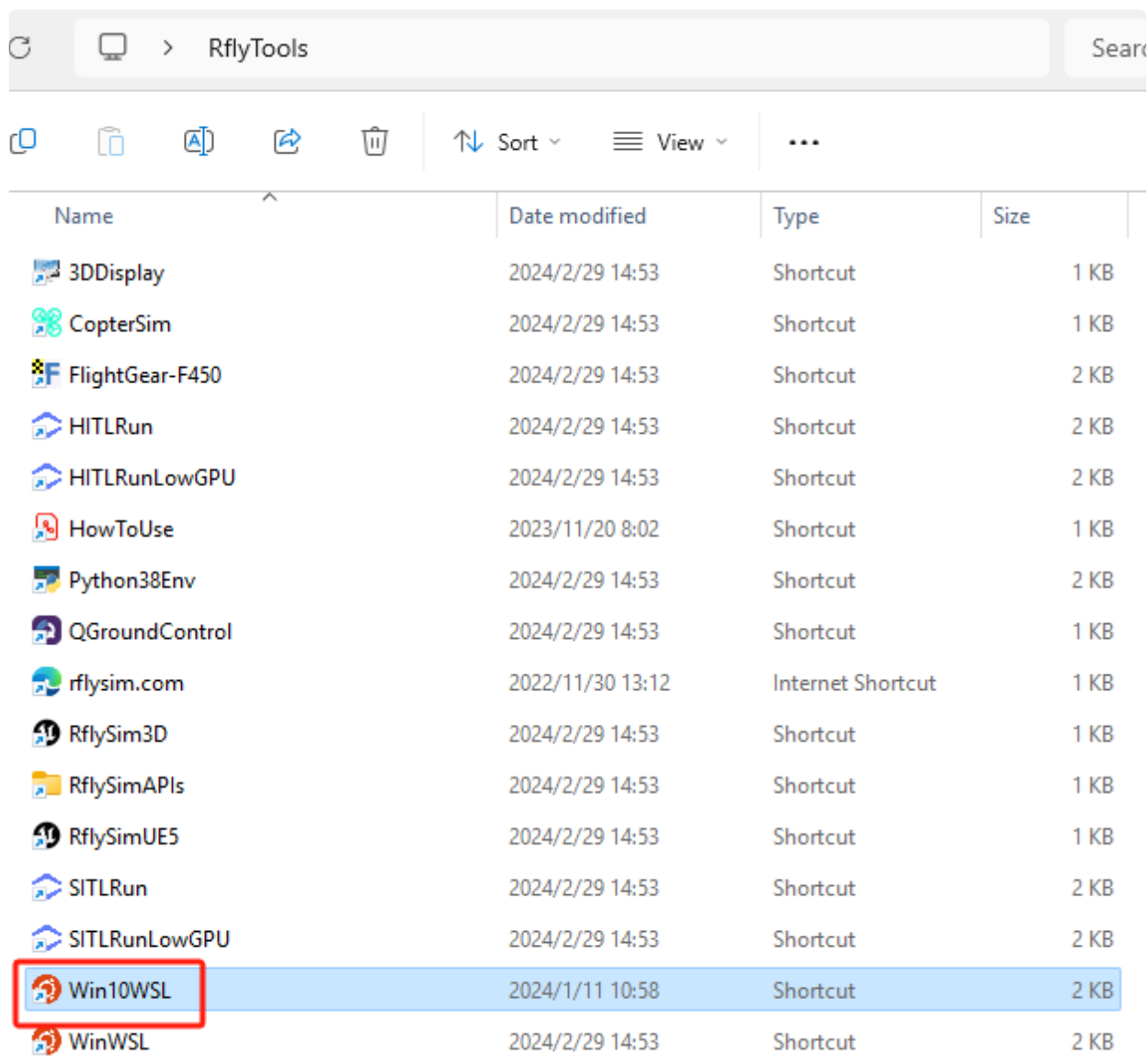
在平台安装目录C:\PX4PSP\Firmware\boards\px4\fmv-v6x找到default.cmake



使用记事本或者vs code打开，取消如下注释

```
86 rover_pos_control
87 sensors
88 sih
89 temperature_compensation
90 #uuv_att_control
91 #uuv_pos_control
92 vmount
93 vtol_att_control
94 SYSTEMCMDS
95 bl_update
```

打开桌面RflyTools 工具箱中的Win10WSL



确保在如下目录重新编译固件












```
root@Rfly: /mnt/c/PX4PSP/Fir x + v
root@Rfly: /mnt/c/PX4PSP/Firmware# make px4_fmu-v6x_default
```

按下图所示将飞控与计算机连接并烧录编译好的固件。

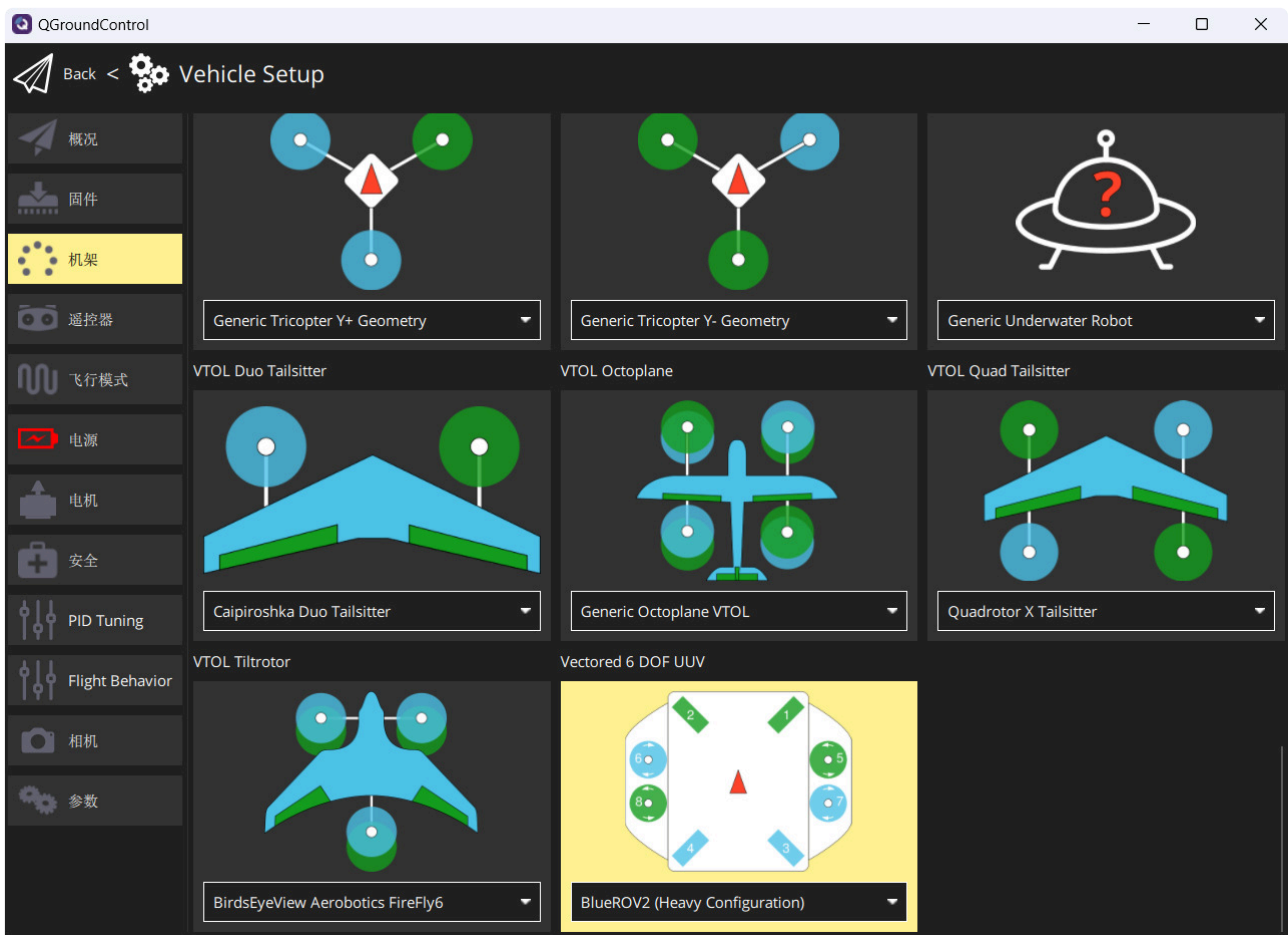


## Step 2: 设置硬件在环机架

在 Rflytools 文件夹中打开 QGC 地面站。

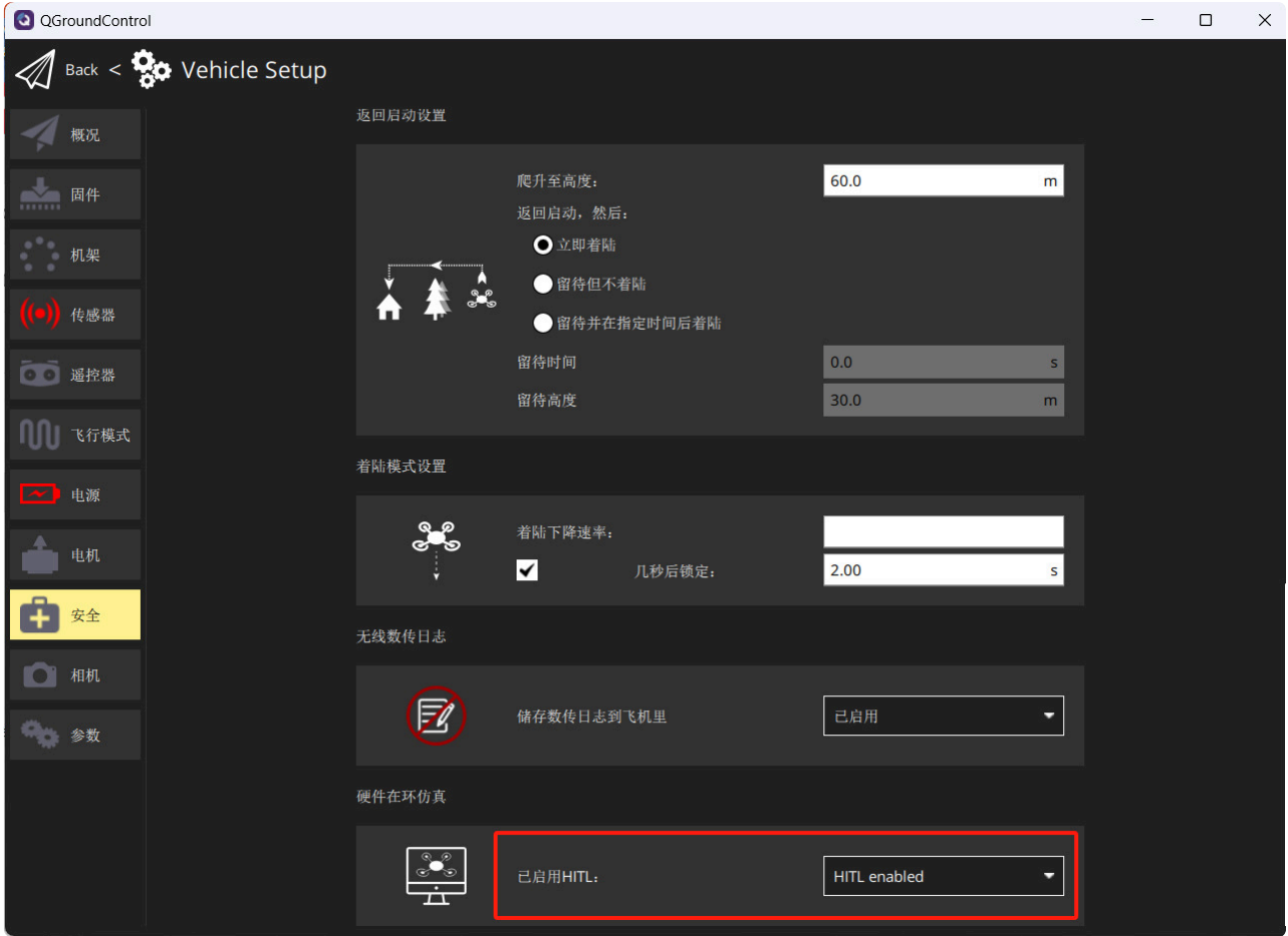
 3DDisplay	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 CopterSim	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 FlightGear-F450	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 HITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 Python38Env	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 QGroundControl	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySim3D	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySimAPIs	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 RflySimUE5	2023/7/27 15:02	快捷方式	1 KB
 SITLRun	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB
 Win10WSL	2023/7/27 15:02	快捷方式	2 KB

在机架界面设置机架型号为“BlueRov2(Heavy Configuration)”，设置完毕后点击右侧“应用并重启”。

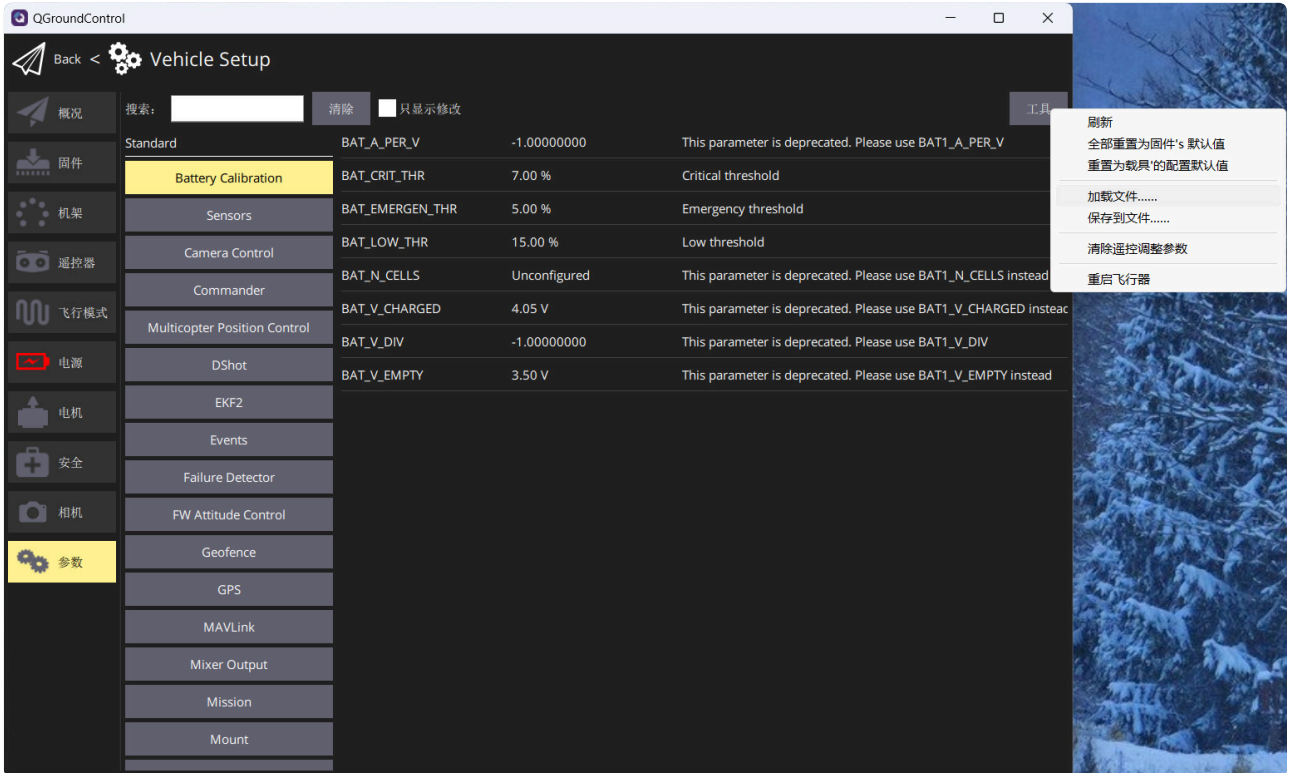


### Step 3: 配置硬件在环参数

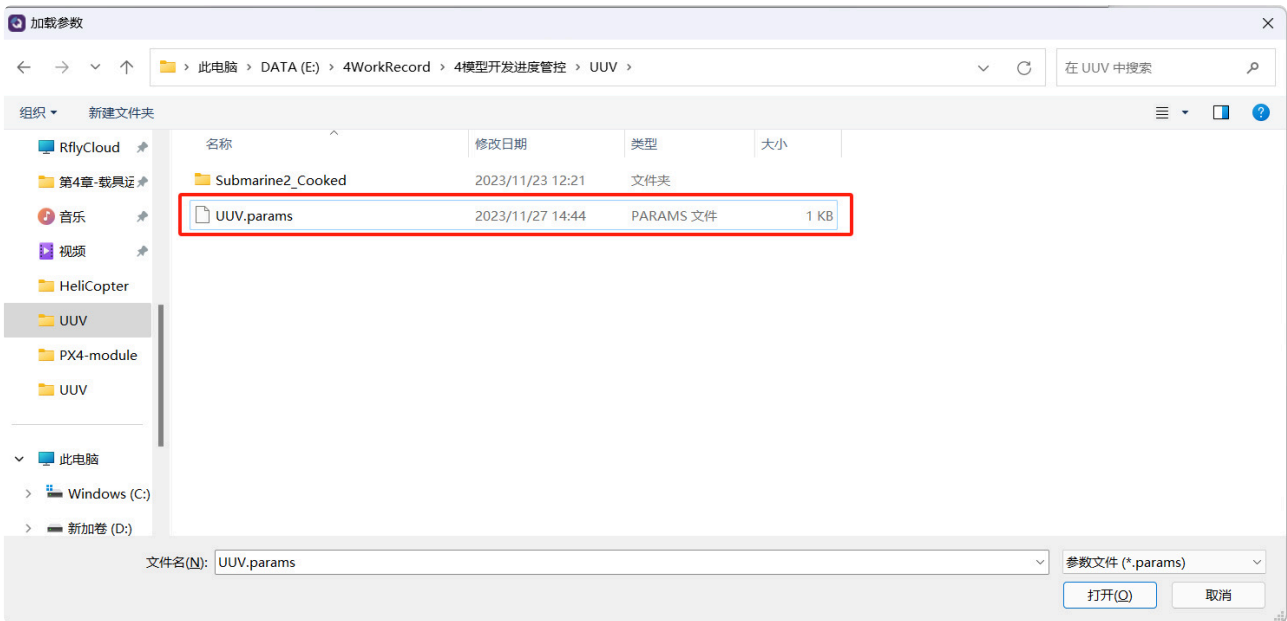
在“安全”界面，选择“HITL enabled”启动硬件在环仿真，重新插拔飞控。



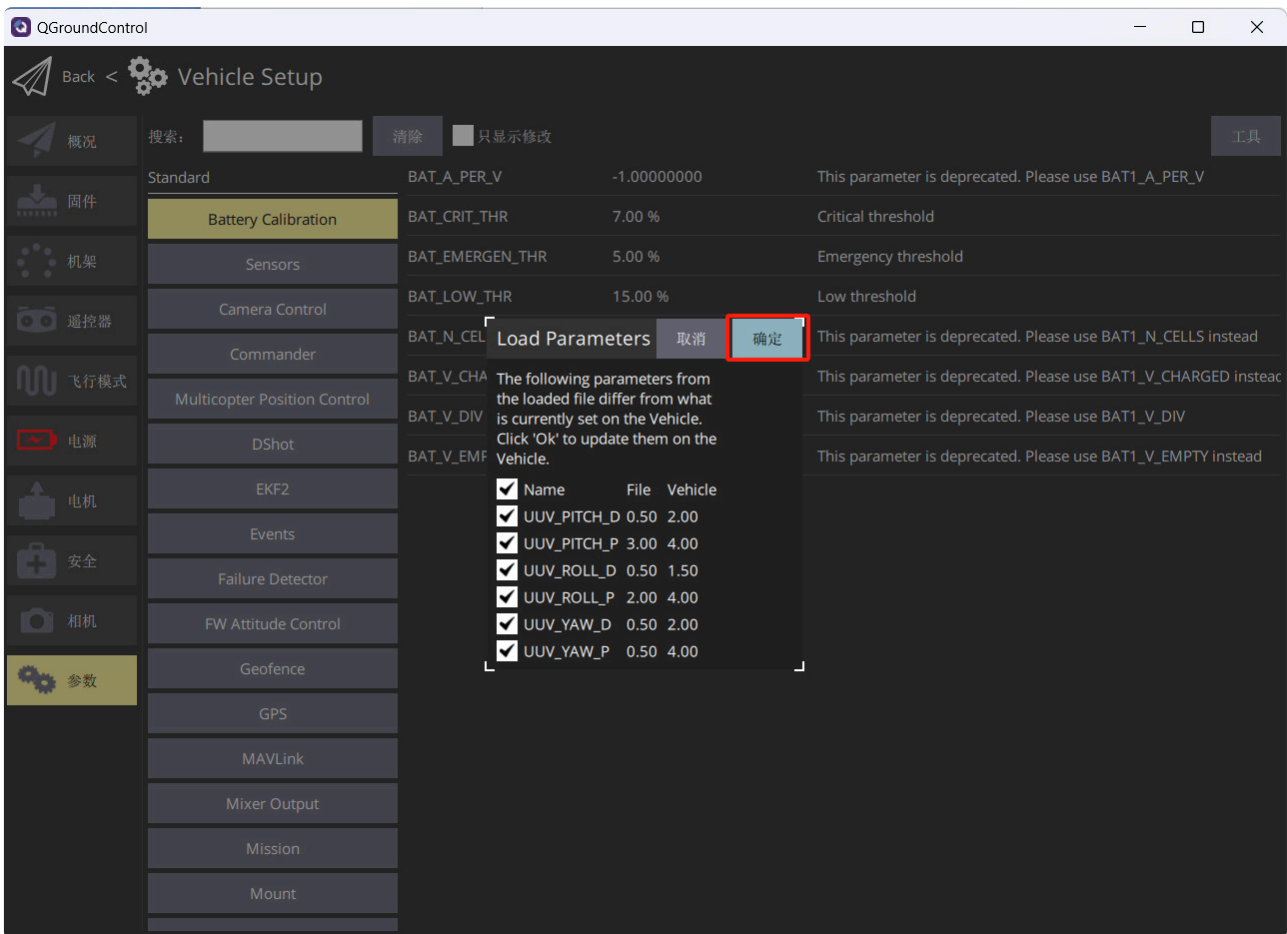
点击“参数”，右键“工具”，选择“加载文件”。



打开“UUV.params”参数文件。



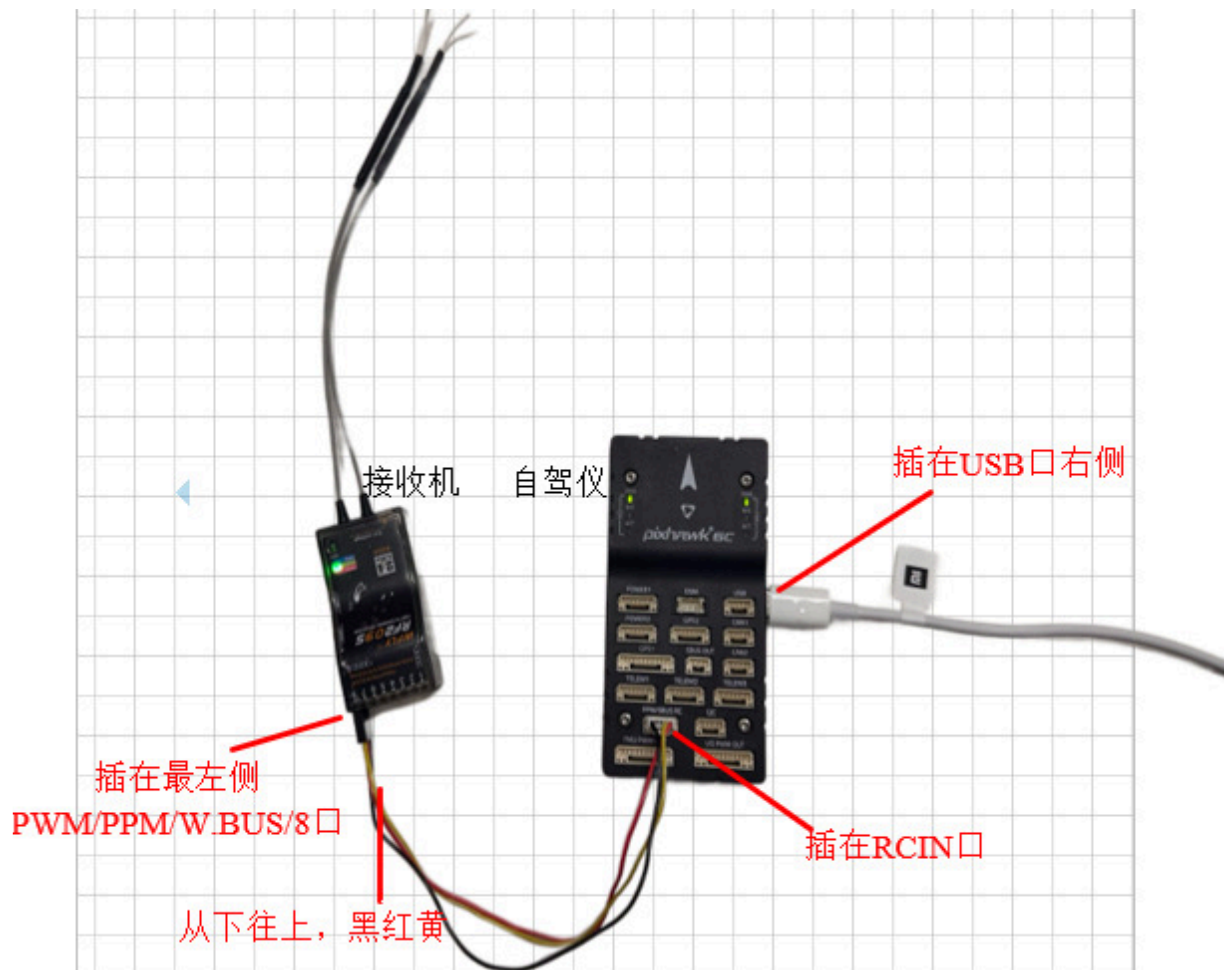
在弹出界面中点击“确定”。



## 5.2. 遥控器配置

### Step 1: 连接接收机

按如下图所示连接接收机和Pixhawk 6x飞控，并通过USB-TypeC线将飞控连接至电脑。



## Step 2: 对码

通电后，长按接收机上的SET3秒，橙灯慢闪，等待发射机对码指令。然后，点击遥控器界面中左上角“WFLY”的图标，点击“通信设置”，点击“对码”。对码成功后，接收机绿灯常亮，发射机RF灯常亮。



## Step 3: 确认摇杆模式

点击待机界面中的“WFLY”，进入“系统设置”，确认“摇杆模式”为“模式2”

## 模式2



### Step 4: 模型选择

该遥控器没有专用的UUV模型，在“WFLY” → “系统设置” → “模型选择”中选择“Model11”。



“机型选择”设置为“直升机”。



在“模型功能” → “十字盘设置”中设置为“普通”类型。



## Step 5: 其他遥控器配置

其他遥控器配置参考“\*:\PX4PSP\RflySimAPIs\2.RflySimUsage\1.BasicExps\e11\_RC-Config\Readme.pdf”。

## 5.3. 硬件在环仿真

### Step 1: 启动仿真

运行“UUVModel\_HITL.bat”，输入飞控端口号后，启动硬件在环仿真。

名称	修改日期	类型	大小
Submarine2_Cooked	2023/11/23 12:21	文件夹	
GenerateModelDLLFile.p	2023/11/22 16:18	MATLAB.p.9.14.0	5 KB
UUV.params	2023/11/27 14:44	PARAMS 文件	1 KB
UUVModel_HITL.bat	2023/11/22 16:18	Windows 批处理...	6 KB
MavLinkStruct.mat	2023/11/22 16:18	MATLAB Data	5 KB
MulticopterModel.zip	2023/11/22 16:18	压缩(zipped)文件...	116 KB
Readme.docx	2023/11/27 11:37	Microsoft Word ...	988 KB
RflySimModelLab.slx	2023/11/22 16:18	Simulink Model	72 KB
UUVModel.dll	2023/11/22 16:18	应用程序扩展	292 KB
UUVModel.slx	2023/11/22 16:18	Simulink Model	68 KB
UUVModel.slxc	2023/11/21 18:02	MATLAB.slxc.9.1...	134 KB
UUVModel_2017B backup 2022.10.1...	2023/11/22 16:18	压缩(zipped)文件...	86,958 KB
UUVModel_2017B.7z	2023/11/22 16:18	WinRAR 压缩文件	14,854 KB
UUVModel_init.m	2023/11/22 16:18	MATLAB Code	8 KB
UUVModel_SITL.bat	2023/11/22 16:18	Windows 批处理...	6 KB

```
C:\WINDOWS\system32\cmd. x + v
已复制      1 个文件。

-----
Please input the Pixhawk COM port list for HITL
Use ',' as the separator if more than one Pixhawk
E.g., input 3 for COM3 of Pixhawk on the computer
Input 3,6,7 for COM3, COM6 and COM7 of Pixhawks

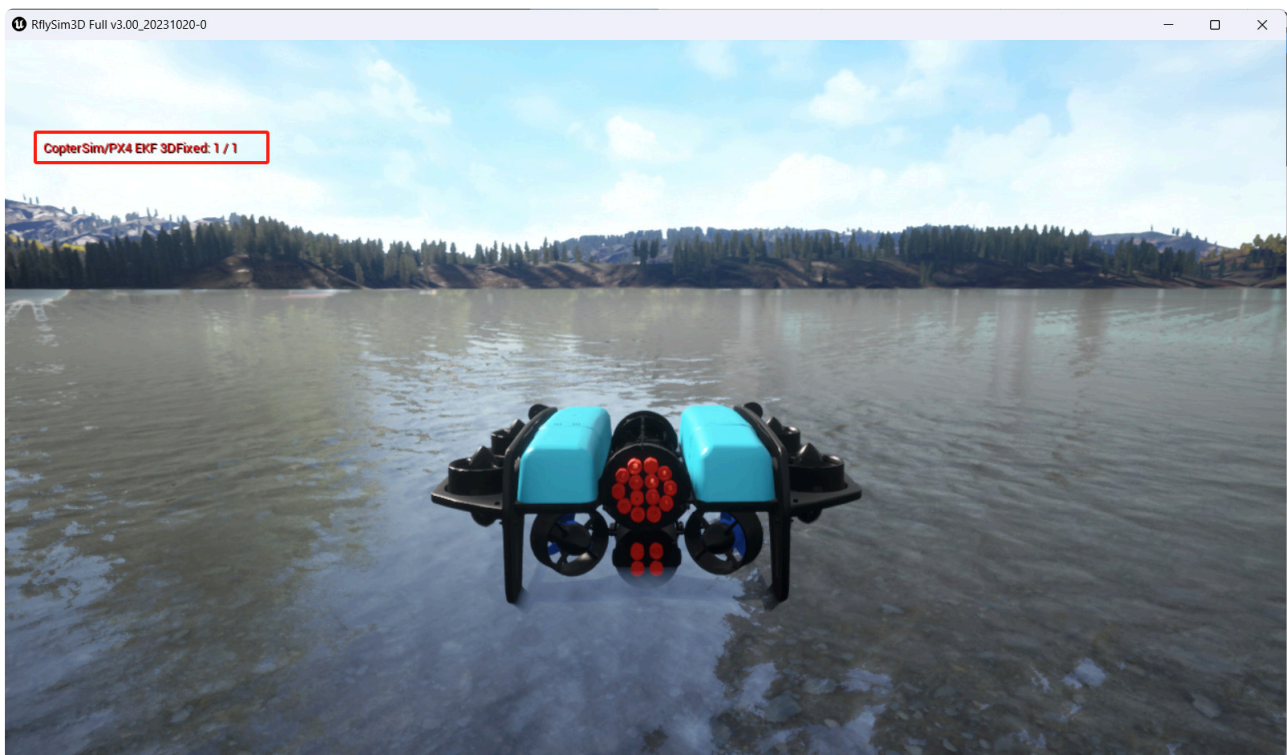
Available COM ports on this computer are:
COM3: USB ????

Recommended COM list input is: 3

-----
My COM list for HITL simulation is:3
Kill all CopterSims
Start QGroundControl
请按任意键继续. . . |
```

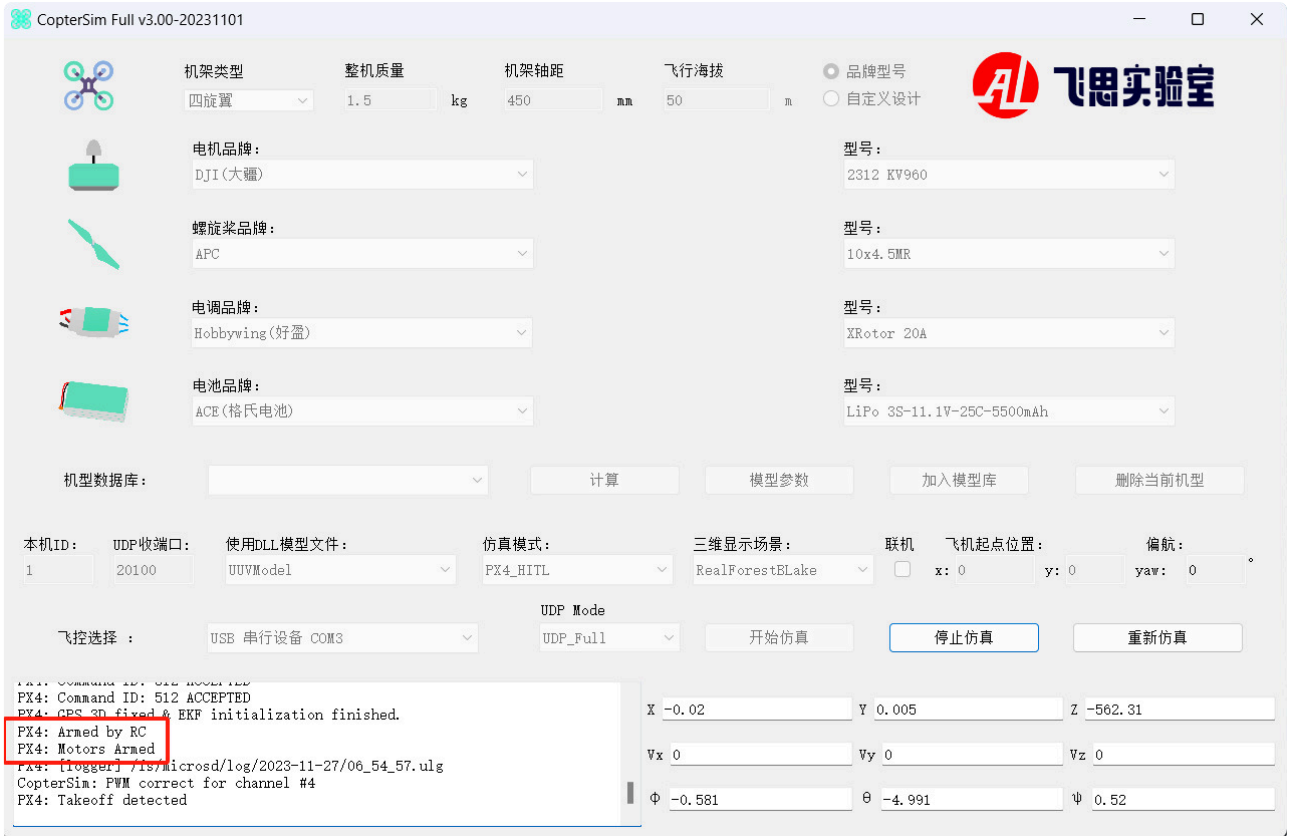
## Step 2: 等待初始化完成

RflySim3D左上角显示该信息，即表明仿真完成初始化，可以开始通过遥控器进行操控。



## Step 3: 解锁UUV

拨动遥控器转换开关，UUV解锁。



## Step 4: 油门控制

拨动遥控器油门推杆，在三维场景中可以看到UUV在前进，UUV最大前进速度为1.5m/s。



## Step 5: 偏航角控制

拨动遥控器方向推杆，在三维场景中可看到UUV偏航角迅速变化，左上角数据中也可以看到偏航角速率增大/减小。



## Step 6: 滚转/俯仰控制

以相应的方式，可以操控滚转/俯仰通道。

## 6. 参考资料

1. DLL/SO模型与通信接口..\..\API.pdf
2. 外部控制接口..\..\API.pdf
- 3.

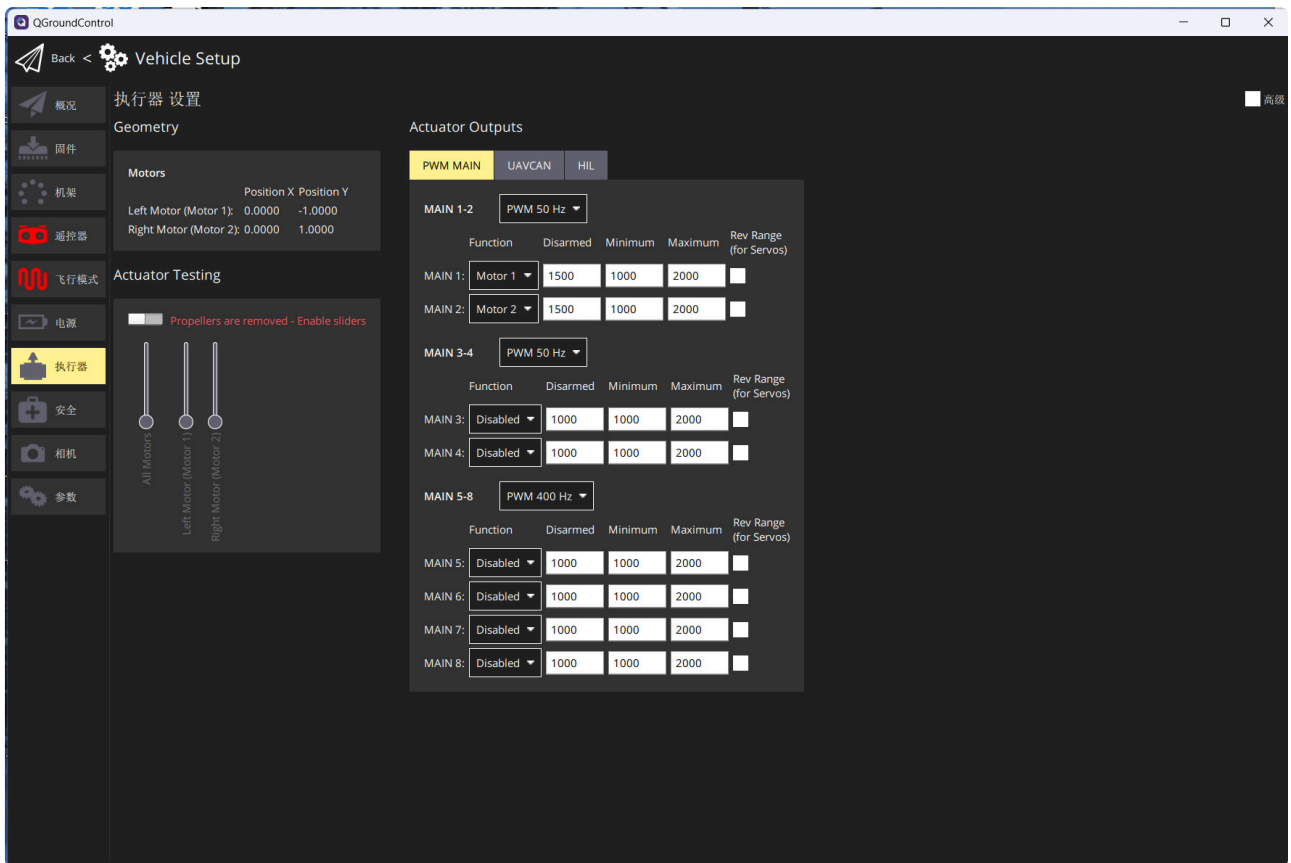
## 7. 常见问题

1. PX4 1.14版本固件全面启用了动态混控的规则，体现在使用1.14版本固件进行软硬件在环仿真时，QGC车辆设置页面会新增“执行器”页面，具体内容见

[控制分配](#)

[\(混控\) | PX4 自动驾驶用户指南](#)

[\(main\)](#)

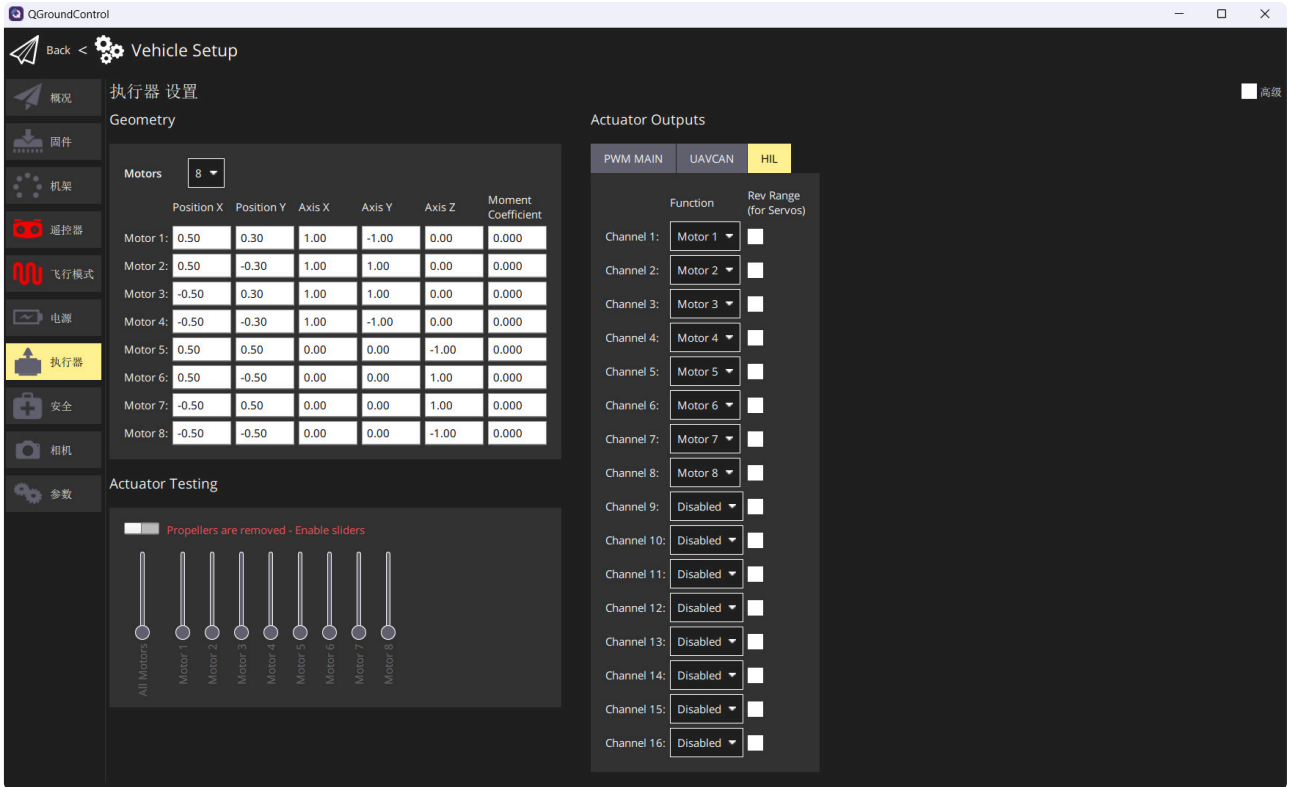


## 控制分配 (混控)

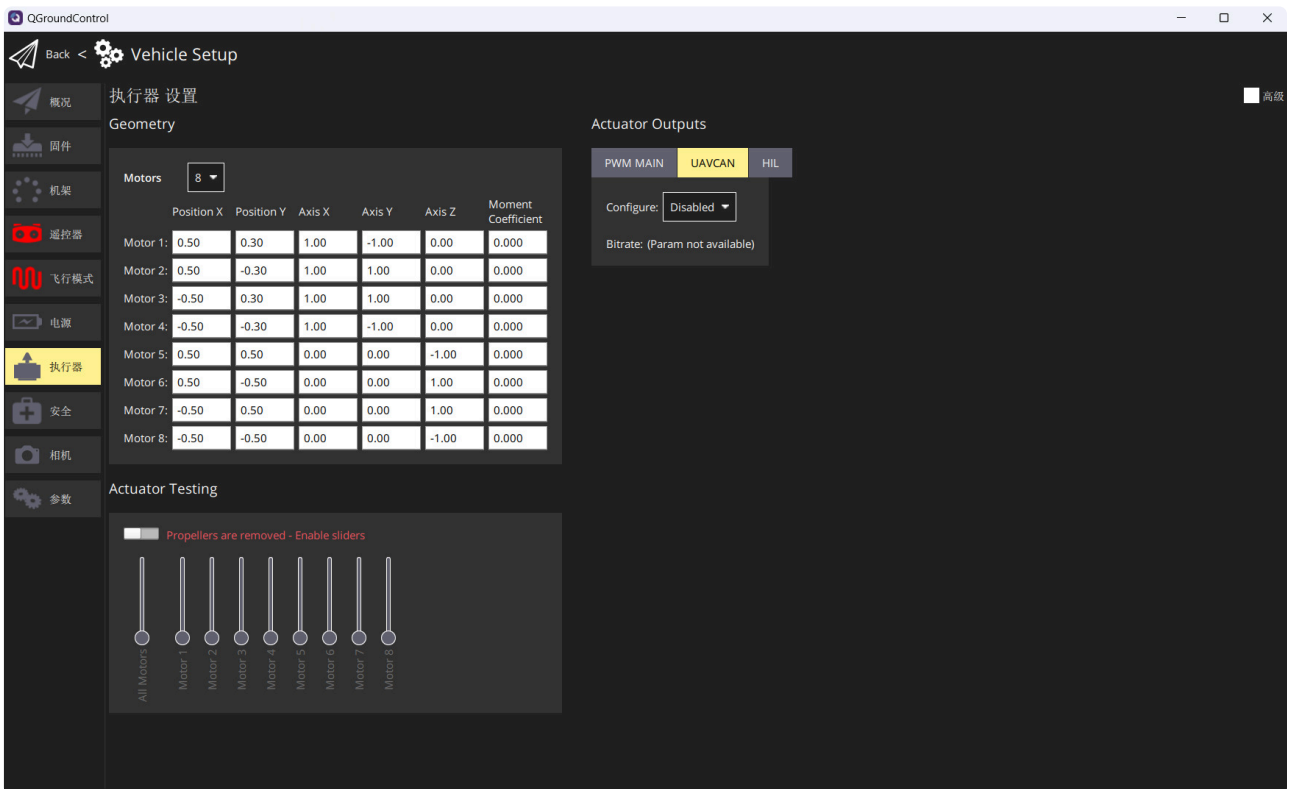
### 注解

控制分配取代了在 PX4 v1.13 中使用的旧的混控方法。PX4 v1.13 文档见：[混控& 驱动器](#)，[构型文件](#) 和 [添加一个新的机型配置](#)。

如果需要以1.14版本固件进行软硬件在环仿真，除了硬件在环通常要设置的选项，还需要在 QGC 执行器页面中按如下图所示完成 Actuator Outputs HIL 设置：



并且设置UAVCAN为Disabled，完成设置后重新插拔飞控，即可正常仿真。



Q2: 编译报错，无法加载库文件



A2: 这可能是由于安装平台时PX4PSP工具箱未更新到最新版，更新RflySim安装包后按照如下配置重新安装平台即可

